



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

ANTÓNIO PEDRO SAID ALY DE PINA

**AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E A VULNERABILIDADE
AQUÍFERA NA ILHA DE SANTIAGO – CABO VERDE**

Orientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante – DEGEO/CC/UFC

Co- Orientador: Prof. Dr. João Paulo do C. Lobo Ferreira – LNEC-Portugal

FORTALEZA – CEARÁ, BRASIL.

DEZEMBRO/2014

ANTÓNIO PEDRO SAID ALY DE PINA

**AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E A VULNERABILIDADE
AQUÍFERA NA ILHA DE SANTIAGO – CABO VERDE**

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito necessário para obtenção do grau de Doutor em Geologia, área de Concentração em Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.

A citação de qualquer trecho desta Tese é permitida desde que se faça de acordo com as normas da ética científica.

Orientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.

Co - Orientador: Prof. Dr. João Paulo C. Lobo Ferreira.

FORTALEZA – CEARÁ, BRASIL.

DEZEMBRO/2014

Aprovada em ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante (Orientador)
Departamento de Geologia /CC/ Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Eneas Oliveira Lousada
Departamento de Geologia /CC/ Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. João José Hiluy Filho
Departamento de Engenharia Química /CT/ Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto
Departamento de Construção Civil /CC/ Instituto Federal do Ceará

Doutora Maria da Conceição Rabelo Gomes
Membro Externo

Assumir com convicção Valores, Missão e Objetivos e mais importante do que definir estes conceitos é acreditar neles!

Mais importante do que registrá-los é colocá-los em prática!

Acredito que fazendo o bem, querendo sempre o melhor e guiado por valores como o respeito pelas pessoas, pelo ambiente, a busca contínua de conhecimento e a excelência como meta, poderei alcançar o objetivo preconizado!

ANTÓNIO PINA (*pai*)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, António Pina e Salima Said Aly que, com certeza, gostariam muito de compartilhar este momento comigo. Agradeço todo amor e educação, conhecimento, dedicação e sabedoria transmitida!

A minha esposa Evelise Ribeiro de Pina pelo amor e, principalmente, pelo tempo que era dela!

Aos meus filhos, Jayden, Kayden e Salymah, amo-vos de verdade!

Tudo o que sou, devo a vós!

OBRIGADO!

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Itabaraci Nazareno Cavalcante, pela douda orientação e acompanhamento, permanente incentivo, amizade e paciência, agradeço a generosidade com que forneceu conhecimentos relevantes e procedeu à leitura/revisão cuidadosa desta Tese. A minha profunda gratidão. Um familiar e um amigo.

Ao Doutor João Paulo do Carcomo Lobo Ferreira, o meu reconhecimento e muito obrigado.

A Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa (FUNCAP), que me concedeu a bolsa de Doutorado para realização da pesquisa e apoio financeiro através da aprovação do Projeto pelo Edital MCT/CNPq 02/2006 – Universal.

Agradeço aos professores, funcionários e colegas do Laboratório de Hidrogeologia do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da UFC.

Ao colega e amigo Lucio Correia Miranda o meu obrigado pelo apoio na confecção de mapas de zoneamento. A amizade e gratidão perdurarão.

Aos meus sogros Herculano Ribeiro e Célia Ribeiro pelo afeto, fé transmita de que o sonho será realizado e o propósito da vida é passar a frente tudo o que se aprende.

Aos familiares ganhos frutos de boa vizinhança Luis Leite e Barbara Lima Leite.

Agradeço ao Instituto Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos de Cabo Verde – INGRH, na pessoa do Eng.º António Pedro Barbosa Borges, da atual direção da CI-ANAS na pessoa do Eng.º Hércules Vieira exemplos de profissionalismo e de flexibilidade.

Aos colegas sempre disponíveis, Dr. Idalina Almeida, Eng.^a Marize Gominho, Dr. Adelcides Ramos Varela e do Sr. Luis Alfama pela preciosa colaboração de dados.

Finalmente, peço desculpas por alguma omissão possível, mas manifesto os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram para a realização do presente trabalho.

RESUMO

As águas subterrâneas são um recurso natural imprescindível para a vida e para a integridade dos ecossistemas que estão deles dependentes. A ilha de Santiago – Cabo Verde possui 991 km², representando cerca de 30% da área total do arquipélago, onde muitos dos ecossistemas estão ameaçados pela sobreexploração das águas subterrâneas, pela poluição antrópica e difusa, pela salinização de aquíferos que os afeta e pelos impactos diretos e indiretos das alterações climáticas na disponibilidade hídrica, todos demandando soluções e urgente conhecimento adequado das características do meio físico. A pesquisa objetiva avaliar as águas subterrâneas e o grau de vulnerabilidade aquífera das diversas formações hidrogeológicas à contaminação e decorre fundamentalmente da necessidade de fornecer um instrumento que seja útil nas tomadas de decisão ao nível definição das áreas estratégicas de proteção e recarga de aquíferos. O uso de metodologia pluridisciplinar, tais como análises químicas, análise isotópica, cálculo da recarga pelo método de balanço hídrico climatológico de Thornwaite em função da altitude e o mapeamento da vulnerabilidade aquífera utilizando o índice DRASTIC, permitiram caracterizar a qualidade das águas subterrâneas, identificar ações antrópicas e evidenciar diferenças de composições químicas entre as unidades hidrogeológicas. Os resultados desses estudos estão consubstanciados em sínteses técnicas com informações, diagnósticos, propostas e foram interpretados/tratados através de diagramas de PIPER, mapas de zoneamento hidroquímico dos principais íons maiores, da análise fatorial de componentes e do mapeamento de vulnerabilidade DRASTIC. Os valores obtidos mostram que os índices DRASTIC variam entre 65 e 208. Estes índices provam que há situações hidrogeológicas que correspondam a uma vulnerabilidade muito elevada a escala de 1:220.000. A recarga natural de aquífero só acontece nas zonas de maior altitude (> 600 m) consideradas zonas semi-úmidas e tendo precipitações máximas de 129,6 mm/ano. A média anual de precipitação atmosférica durante os 47 anos de registros pluviométricos é de 306,3 mm/ano com variabilidade espacial não homogênea num curto período de tempo (Agosto-Outubro) com evapotranspiração potencial da ordem de 1628,30 mm/ano e temperatura média anual de 26,5 °C.

Palavras- chave: Qualidade, vulnerabilidade, poluição hídrica, DRASTIC.

ABSTRACT

Groundwater is an essential natural resource for life and the integrity of ecosystems that are dependent on them. Santiago Island - Cape Verde has 991 km², representing about 30% of the total area of the archipelago, where many ecosystems are threatened by over-exploitation of groundwater by human and diffuse pollution, salinization of aquifers and affecting the direct and indirect climate change impacts on water availability, all demanding urgent solutions and adequate knowledge of the characteristics of the physical environment. The research aims to evaluate groundwater and the degree of aquifer vulnerability to contaminations of various hydrogeological formations and fundamentally arises from the need to provide a tool that is useful in decision-making to define strategic areas of protection and groundwater recharge level. The use of multidisciplinary methodology, such as chemical analysis, isotopic analysis, the calculation method of recharging the water balance of Thornwaite as a function of altitude and the mapping of aquifer vulnerability using the DRASTIC index, were used to characterize the quality of groundwater identify human actions and show differences in chemical compositions between hydrogeological units. The results of these studies are embodied in technical summaries with information, diagnoses, and proposals were interpreted/handled by PIPER diagrams, maps hydro chemical zoning of key major ions, factorial components analysis and mapping of vulnerability DRASTIC. The values obtained show that the DRASTIC indices vary between 65 and 208. These indices show that there are hydrogeological situations corresponding to a very high vulnerability to scale 1: 220.000. Natural recharge of the aquifer occurs only in areas of higher altitude (> 600 m) considered semi-humid zones and taking maximum rainfall of 129,6 mm / year. The annual average rainfall during the 47 years of record rainfall is 306,3 mm/year with inhomogeneous spatial variability within a short time period (August-October) with potential evapotranspiration of 1628,30 mm/year and annual mean temperature of 26.5 ° C.

Key-word: Quality, vulnerability, water pollution, DRASTIC.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Dificuldades e formas de acesso à água no interior da ilha de Santiago.....	24
FIGURA 3-1	Arquipélago de Cabo Verde e sua localização na costa ocidental de África..	31
FIGURA 3.1-1	Localização da área de estudo ilha de Santiago - Cabo Verde	33
FIGURA 3.2.1-1	Carta Geológica da ilha de Santiago, Cabo Verde, digitalizada a partir de SERRALHEIRO (1976). Escala 1:220.000	35
FIGURA 3.2.2-1	Grandes unidades geomorfológicas da ilha de Santiago: I - Achadas Meridionais; Ia - Transição para o Flanco Ocidental; II - Maciço Montanhoso do Pico da Antónia; III - Planalto de Santa Catarina; IV- Flanco Oriental; IVA - Transição para o Planalto de Santa Catarina; V - Maciço Montanhoso da Malagueta; Va - Transição para o Tarrafal; VI – Tarrafal; VII - Planalto Ocidental; 1- Vertentes e/ou encostas com abruptos contínuos; 2 - Superfície declivosa com transições bruscas; 3 - Superfície declivosa com transições suaves; 4 - Ação eólica intensa (MARQUES, 1990)	37
FIGURA 3.2.2-2	Imagens das diferentes unidades geomorfológicas da Ilha de Santiago	40
FIGURA 3.2.2-2	Imagens das diferentes unidades geomorfológicas da Ilha de Santiago	41
FIGURA 3.2.3-1.1	Solos da Ilha de Santiago, (FARIA, 1970 e FAO/UNESCO, 1974)	44
FIGURA 3.2.4-1	Localização das Bacias Hidrográficas na ilha de Santiago (JICA, 2010)	49
FIGURA 3.2.5-1	Principais Unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (JICA, 1999)	58
FIGURA 4.1.1-1	Geologia e isolinhas de profundidade (m) do topo de aquífero – ilha de Santiago	69
FIGURA 4.1.2-1	Localização dos pontos de água monitorados para a caraterização hidroquímica subterrânea – ilha de Santiago	74
FIGURA 4.1.2-2	Diagrama de PIPER com chave dos tipos químicos	75
FIGURA 4.1.4-1	Localização dos pontos de água monitorados para a caraterização isotópica da água subterrânea na costa leste – ilha de Santiago	80
FIGURA 4.1.4-2	Representação esquemática do fracionamento isotópico em diversas etapas do ciclo hidrológico (adaptado de COPLEN <i>et al.</i> , 2001)	81

FIGURA 4.1.4-3	Variação do teor de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação de acordo com o modelo de destilação de Rayleigh, partindo de um teor inicial de $\delta^{18}\text{O}_{\text{vapor}} = -11\text{‰}$, à temperatura de 25 °C. As linhas a tracejado estabelecem a ligação entre a composição isotópica da precipitação e as respectivas temperaturas de condensação. (Adaptado de CLARK & FRITZ, 1997)	84
FIGURA 4.1.5-1.1	Representação esquemática dos fluxos do balanço hídrico indicando as possíveis entradas e saídas de água de um volume de controlo, (Adaptado: PEREIRA <i>et al.</i> , 2002)	87
FIGURA 4.1.6-1.1	Parâmetros hidrogeológicos incorporados no modelo DRASTIC (FERREIRA, 1981)	95
FIGURA 4.1.6-2-7	Ábaco que condiciona a condutividade hidráulica com a litologia (Adaptado de FREEZE & CHERRY, 1979)	105
FIGURA 5.1-1	Relação entre a precipitação média anual (mm) e a altitude (m) na ilha de Santiago (série de dados 1961-2008)	108
FIGURA 5.1-2	Relação entre a precipitação média anual (mm) e a distância à costa (m) na ilha de Santiago (série de dados 1961-2008)	108
FIGURA 5.1-3	Distribuição da precipitação média anual (mm) da ilha de Santiago (série de dados 1961-2008)	110
FIGURA 5.2.2-1	Diagrama pC- pH para uma solução carbonatada a 10^{-5} M e a 25 °C (SNOEYINK e JENKINS, 1980)	115
FIGURA 5.2.2-2	Evolução sazonal dos valores de pH <i>vs</i> HCO_3^- (mg/L) em função da média anual e da época (<i>seca ou chuvosa</i>) durante dez anos de monitoramento	117
FIGURA 5.2.2-3	Distribuição espacial do pH na água subterrânea da ilha de Santiago	118
FIGURA 5.2.3-1	Aspecto de bombeamento de água numa cacimba – ilha de Santiago – Ribeira Seca	120
FIGURA 5.2.3-2	Diagrama mostrando a relação entre a água doce e a água do mar nas camadas artesianas (CEDERSTROM, 1964)	121
FIGURA 5.2.3-3	Apanha da areia na ilha de Santiago - Ribeira da Barca Charco	122
FIGURA 5.2.3-4	Esquematisação da interface água doce/salgada num aquífero costeiro (CEDERSTROM, 1964)	123

FIGURA 5.2.3-5	Zoneamento hidroquímico da Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) na água subterrânea na ilha de Santiago	124
FIGURA 5.2.4-1	Zoneamento hidroquímico de Na^+ (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	127
FIGURA 5.2.5-1	Zoneamento hidroquímico dos Cl^- (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	129
FIGURA 5.2.5-2	Concentração de Na^+ em função da concentração dos Cl^- (meq/L)	131
FIGURA 5.2.5-3	Evolução anual da CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) <i>vs</i> $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ (mg/L) em função da média anual e da época (<i>seca ou chuvosa</i>) durante dez anos de monitoramento	132
FIGURA 5.2.6-1	Zoneamento hidroquímico do K^+ (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	135
FIGURA 5.2.7-1	Zoneamento hidroquímico de Ca^{+2} (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	138
FIGURA 5.2.8-1	Zoneamento hidroquímico de Mg^{+2} (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	141
FIGURA 5.2.9-1	Zoneamento hidroquímico de HCO_3^- (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	143
FIGURA 5.2.9-2	Concentração média de HCO_3^- <i>vs</i> Ca^{2+} (meq/L) nos pontos de amostrados e localizados na faixa costeira durante dez anos de monitoramento	144
FIGURA 5.2.9-3	Concentrações de HCO_3^- <i>vs</i> Ca^{2+} nas águas subterrâneas da ilha de Santiago	145
FIGURA 5.2.9-4	Razões iônicas entre o quociente das concentrações de $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ <i>vs</i> CE nos pontos de amostrados junto a costa durante dez anos de monitoramento	146
FIGURA 5.2.10-1	Zoneamento hidroquímico de SO_4^{-2} (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	148
FIGURA 5.2.11-1	Zoneamento hidroquímico de NO_3^- (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	151
FIGURA 5.2.11-2	Projeção e distribuição da concentração de NO_3^- (mg/L) na água subterrânea na ilha de Santiago	152
FIGURA 5.3.1-1	Distribuição da fácies hidroquímicas na Unidade Hidrogeológica de Base, na ilha de Santiago	154

FIGURA 5.3.1-2	Classificação em termos dos STD na Unidade Hidrogeológica de Base, na ilha de Santiago	155
FIGURA 5.3.1-3	Distribuição da fácies hidroquímicas na Unidade Hidrogeológica Intermédia, na ilha de Santiago	155
FIGURA 5.3.1-4	Classificação em termos dos STD na Unidade Hidrogeológica Intermédia, na ilha de Santiago	156
FIGURA 5.3.1-5	Distribuição da fácies hidroquímicas na Unidade Hidrogeológica Recente, na ilha de Santiago	156
FIGURA 5.3.1-6	Classificação em termos dos STD na Unidade Hidrogeológica Recente, na ilha de Santiago	157
FIGURA 5.3.2-1	Fator 1 versus Fator 2 da análise das respetivas Unidades Hidrogeológicas: projeção no plano dos centróides de cada parâmetro	161
FIGURA 5.3.2-2	Análise fatorial com todas as amostras	162
FIGURA 5.4-1	Apresentação do diagrama do USSSL, onde estão inseridos os resultados das análises de água da Barragem de Poilão (Outubro de 2009)	164
FIGURA 5.5-1	Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ na água do mar em função da latitude dos locais de amostragem	168
FIGURA 5.5-2	Distribuição espacial dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW) nas águas subterrâneas da ilha de Santiago	170
FIGURA 5.5-3	Projeção dos teores isotópicos das águas subterrâneas e da água do mar no diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ e comparação com a reta meteórica global (RMG) ...	171
FIGURA 5.5-4	Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas em função da longitude	172
FIGURA 5.5-5	Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ e dos valores de CE das águas subterrâneas	173
FIGURA 5.5-6	Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas em função da latitude ..	174
FIGURA 5.6-1	Caracterização do parâmetro D: Profundidade do topo do aquífero no índice DRASTIC	178
FIGURA 5.6-2-1	Representação simplificada do extrato do Balanço Hídrico normal mensal para a ilha de Santiago, Cabo Verde	181
FIGURA 5.6-2.2-a	Construção no leito das ribeiras	182
FIGURA 5.6-2.2-b	Escoamento superficial em áreas habitacionais	182
FIGURA 5.6-2.3-c	Escoamento superficial em direção ao mar (INMG – 2013)	182
FIGURA 5.6-2.3-d	Escoamento superficial em direção ao mar (INMG – 2013)	182

FIGURA 5.6.2-4	Representação simplificada do extrato do Balanço Hídrico normal mensal (P, ETP e ETR) para a zona considerada semiárida (200 a 350 mm)	184
FIGURA 5.6.2-5	Representação simplificada do extrato do Balanço Hídrico normal mensal (P, ETP e ETR) para a zona considerada semiárida (200 a 350 mm)	184
FIGURA 5.6.2-6	Representação simplificada do extrato do Balanço Hídrico normal mensal (P, ETP e ETR) para a zona considerada semi-húmida (350 a 500 mm) ...	185
FIGURA 5.6.2-7	Representação simplificada do extrato do Balanço Hídrico normal mensal (P, ETP e ETR) para a zona considerada semi-húmida (350 a 500 mm) ...	185
FIGURA 5.6.2-8	Representação simplificada do extrato do Balanço Hídrico normal mensal (P, ETP e ETR) para a zona considerada semi-húmida (> 500 mm)	186
FIGURA 5.6.2-9	Representação simplificada do extrato do Balanço Hídrico normal mensal (Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição) para a zona considerada semi-húmida (> 500 mm)	186
FIGURA 5.6.2-10	Hipsometria e áreas de recarga na ilha de Santiago	188
FIGURA 5.6.3-1	Caracterização do parâmetro A: Material do Aquífero no índice DRASTIC	190
FIGURA 5.6.4-1	Caracterização do parâmetro S: Tipo de Solo no índice DRASTIC	191
FIGURA 5.6.5-1	Caracterização do parâmetro T: Topografia no índice DRASTIC	194
FIGURA 5.6.6-1	Caracterização do parâmetro I: Influência da zona vadosa no índice DRASTIC	195
FIGURA 5.6.7-1	Caracterização do parâmetro C: condutividade hidráulica no índice DRASTIC	196
FIGURA 5.7-1	Índice DRASTIC de vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas na ilha de Santiago	198

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.2.3-1.1	Classificação do solo da ilha de Santiago tendo como referência os estudos de FARIA (1970) e as classificações da FAO/UNESCO (1988) e USA Soil Taxonomy (1975)	45
QUADRO 3.2.5-1	Caracterização geológica, hidrogeológica e distribuição das rochas na ilha de Santiago (Adaptado, PINA, 2014)	53
QUADRO 3.2.5-2	Caracterização e distribuição dos principais parâmetros hidráulicos na ilha de Santiago (Adaptado, PINA, 2014)	54
QUADRO 3.2.5-3	Principais características das unidades hidrogeológicas da Ilha de Santiago BURGEAP, (1974)	57
QUADRO 3.2.6-1	Distribuição dos pontos de água por Concelho e monitorados pelo ANAS – 2014	60
QUADRO 3.2.6-2	Volumes de água (m ³) explotada nos diferentes pontos monitorados pelo ANAS	61
QUADRO 3.2.6-3	Histogramas dos diferentes usos de água monitorados pelo INGRH/ANAS	62
QUADRO 4.1.1-1	Síntese dos dados de precipitação existentes	66
QUADRO 4.1.1-2	Precipitações mensais médias e anuais médias Anos hidrológicos – 1961/62 à 2007/2008	67
QUADRO 4.1.1-3	Dados de precipitação média anual, da altitude e da distância à costa	68
QUADRO 4.1.3-1	Classificação da água de irrigação quantos aos riscos de sodicidade (AYRRES & WESTCOT, 1991)	78
QUADRO 4.1.5-1.1	Valores do fator de ajuste em função da temperatura média do período (CAMARGO, 1993)	86
QUADRO 4.1.6-1.1	Peso relativo de cada parâmetro do índice DRASTIC	95
QUADRO 4.1.6-1.2	Valores referentes aos intervalos do índice DRASTIC	96
QUADRO 4.1.6-1.3	Características do parâmetro DRASTIC e fonte de dados	97
QUADRO 4.1.6-2.1	Valores referentes aos intervalos do índice DRASTIC - Parâmetro D	99
QUADRO 4.1.6-2.2	Valores referentes aos intervalos do índice DRASTIC - Parâmetro R	100
QUADRO 4.1.6-2.3	Valores referentes aos intervalos do índice DRASTIC - Parâmetro A	101
QUADRO 4.1.6-2.4	Valores referentes aos intervalos do índice DRASTIC - Parâmetro S	102
QUADRO 4.1.6-2.5	Valores referentes aos intervalos do índice DRASTIC - Parâmetro T	102
QUADRO 4.1.6-2.6	Valores referentes aos intervalos do índice DRASTIC - Parâmetro I	103
QUADRO 4.1.6-2.7	Valores referentes aos intervalos do índice DRASTIC - Parâmetro C	104

QUADRO 5.2.1-1	Dado estatístico dos valores de temperatura (°C) das águas nas três Unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010).....	114
QUADRO 5.2.2-1	Dados estatísticos dos valores de pH (escala Sourense) das águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001 - 2010)	116
QUADRO 5.2.3-1	Dados estatísticos dos valores da CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010)	120
QUADRO 5.2.4-1	Dados estatísticos dos valores de Na^+ (mg/L) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010)	126
QUADRO 5.2.5-1	Dados estatísticos dos valores de Cl^- (mg/L) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010)	128
QUADRO 5.2.6-1	Dados estatísticos dos valores de K^+ (mg/L) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010)	133
QUADRO 5.2.7-1	Dados estatísticos dos valores de Ca^{+2} (mg/L) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001 - 2010)	137
QUADRO 5.2.8-1	Dados estatísticos dos valores de Mg^{+2} (mg/L) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010)	140
QUADRO 5.2.9-1	Dados estatísticos dos valores de HCO_3^- (mg/L) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010)	142
QUADRO 5.2.10-1	Dados estatísticos dos valores de SO_4^{-2} (mg/L) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010)	147
QUADRO 5.2.11-1	Dados estatísticos dos valores de NO_3^- (mg/L) nas águas subterrâneas das três unidades hidrogeológicas da ilha de Santiago (série de dados 2001-2010)	149

QUADRO 5.3.2-1	Divisão das variáveis em classes	158
QUADRO 5.3.2-2	Relação da variância explicada por cada um dos fatores resultantes da análise fatorial de componentes com 133 amostras e 10 variáveis	159
QUADRO 5.3.2-3	Relação da variância explicada por cada um dos fatores resultantes da análise fatorial de componentes com todas as amostras com CE >500 $\mu\text{S/cm}$ (46) e com as variáveis mais influentes(8)	159
QUADRO 5.4-1	Classificação da água de irrigação quanto aos riscos de sodicidade (AYRRES & WESTCOT, 1991)	163
QUADRO 5.4-2	Classificação da água de irrigação quanto aos riscos de salinidade (FRENKEL (1984) & PIZARRO (1991)	164
QUADRO 5.4-3	Classificação do estado trófico de albufeiras (USDA, 1982)	165
QUADRO 5.4-4	Parâmetros analisados da amostra da água da Barragem de Poilão e resultados obtidos	165
QUADRO 5.5-1	Características dos pontos de amostragem e respectivos resultados analíticos	167
QUADRO 5.6-2-1	Resultado da elaboração do Balanço Hídrico Climatológico para a ilha de Santiago, Cabo Verde	181
QUADRO 5.6-2-2	Distribuição parcial da precipitação (mm) em função da altitude e área ocupada na ilha	183
QUADRO 5.6-2-3	Balanço Hídrico Climatológico para a zona considerada semiárida (200 a 350 mm)	184
QUADRO 5.6-2-4	Balanço Hídrico Climatológico para a zona considerada semi-húmida (350 a 500 mm)	185
QUADRO 5.6-2-5	Balanço Hídrico Climatológico para a zona considerada semiárida (>500 mm)	186
QUADRO 5.7-1	Valores do parâmetro “Condutividade Hidráulica do Aquífero” em função das formações geológicas presentes	193

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE QUADROS

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

CAPÍTULO 1 22

1. INTRODUÇÃO 23

CAPÍTULO 2 27

2. OBJETIVOS DO TRABALHO 28

2.1 Objetivo geral 29

2.2 Objetivos específicos 29

CAPÍTULO 3 30

3. ENQUADRAMENTO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO 30

3. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE . 31

3.1 Enquadramento da área de estudo – ilha de Santiago 33

3.2 Contextos geológico, geomorfológico e pedológico 34

3.2.1 Geologia 34

3.2.2 Contexto geomorfológico 36

3.2.3 Solos 42

3.2.3-1 Classificações, características e condições de ocorrência dos solos 42

3.2.4 Bacias hidrográficas 48

3.2.5 Hidrogeologia 51

3.2.6 Situação atual dos recursos hídricos na ilha de Santiago 59

CAPÍTULO 4

63

4.	METODOLOGIA DE TRABALHO	64
4.1	ABORDAGENS PREVISTAS PARA O ESTUDO	64
4.1.1	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E DA POTENCIOMETRIA	65
4.1.2	GEOQUÍMICA E QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	70
4.1.3	QUALIDADE DE ÁGUA DA BARRAGEM DE POILÃO – fins agrícolas	77
4.1.4	ASSINARURA ISOTÓPICA	80
4.1.5	RECARGA	85
4.1.5-1	Método do Balanço Hídrico Climatológico de Thornthwait (1955)	85
4.1.6	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE ÍNDICE DRASTIC	91
4.1.6-1	Matriz DRASTIC	94
4.1.6-2	Descrições dos parâmetros - DRASTIC	98
4.1.6-2-1	Parâmetro D – Profundidade do Topo do Aquífero	99
4.1.6-2-2	Parâmetro R – Recarga do Aquífero	100
4.1.6-2-3	Parâmetro A – Material do Aquífero	100
4.1.6-2-4	Parâmetro S – Tipo de Solo	101
4.1.6-2-5	Parâmetro T – Topografia	102
4.1.6-2-6	Parâmetro I – Influência na zona vadosa	103
4.1.6-2-7	Parâmetro C – Condutividade hidráulica do Aquífero	104

CAPÍTULO 5

106

5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
5.1	CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	107
5.2	GEOQUÍMICA E QUALIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	112
5.2 - 1	Temperatura	113
5.2 - 2	pH	114
5.2 - 3	Condutividade Elétrica - CE	119
5.2 - 4	Sódio - Na ⁺	125
5.2 - 5	Cloretos - Cl ⁻	128
5.2 - 6	Potássio - K ⁺	133
5.2 - 7	Cálcio - Ca ²⁺	136

5.2 - 8	Magnésio - Mg^{2+}	139
5.2 - 9	Bicarbonatos - HCO_3^-	142
5.2 - 10	Sulfatos - SO_4^{2-}	147
5.2 - 11	Nitratos - NO_3^-	149
5.3	PRINCÍPIOS DE CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS	153
5.3 - 1	Diagrama de PIPER	153
5.3 - 2	Análise fatorial de componentes nas águas	158
5.4	QUALIDADE DA ÁGUA DA BARRAGEM DE POILÃO - fins agrícolas	163
5.5	ISÓTOPOS AMBIENTAIS	167
5.6	CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DRASTIC	176
5.6 - 1	Profundidade do topo do aquífero – D	176
5.6 - 2	Recarga do aquífero – R	179
5.6 - 3	Material do aquífero – A	189
5.6 - 4	Tipo de Solo – S	189
5.6 - 5	Topografia – T	192
5.6 - 6	Influência na zona vadosa – I	192
5.6 - 7	Condutividade Hidráulica – C	192
5.7	VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – ÍNDICE DRASTIC	197

6. CAPÍTULO 6

6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	199
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	211

ANEXO I: Coordenadas das estações dos postos pluviométricos.

ANEXO II: Análises químicas.

A1: Unidade Aquífera de Base;

A2: Unidade Aquífera Recente;

A3: Unidade Aquífera Intermédia;

A4: Razões Iónicas (costa leste da ilha de Santiago);

ANEXO III: Informação geológica dos pontos amostrados, Nível Estático (NE) e Cota (2013).

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD: Água Disponível.

ALT: Alteração.

ARM: Armazenamento.

AT: Alcalinidade Total.

CAD: Capacidade de Água Disponível.

Cc: Capacidade de Campo do solo.

CE: Condutividade Elétrica.

CPCS: Comissão de Pedologia e de Cartografia de Solos.

CSR: Carbono Sódico Residual.

ETR: Evapotranspiração Real.

ETP: Evapotranspiração Potencial.

EXC: Excesso Hídrico.

DEF: Deficit Hídrico.

DQO: Demanda Química de Oxigênio.

DT: Dureza Total.

E_d: Taxa de Escoamento.

E_h: Potencial Redox.

FAO: *Food and Agriculture Organization*. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura.

GPS: *Global Positioning System*. Sistema de posicionamento global.

IDW: *Inverse Distance Weighted*. Inverso do peso da distância.

INE: Instituto Nacional de Estatística de Cabo Verde.

INGRH: Instituto Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos de Cabo Verde.

INMG: Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica – Delegação Praia.

Is: Infiltração Superficial.

MDT: Modelo Digital do Terreno.

NEG. ACUM: Negativo Acumulado.

NE: Nível Estático.

OD: Oxigênio Dissolvido.

pH: Potencial de Hidrogênio.

PM: Ponto de Murchamento.

RAS: Razão de Adsorção Sódica.

RASa: Razão de Adsorção Sódica ajustada.

RMG: Reta Meteórica Global.

RMR: Reta Meteórica Regional.

RP: Profundidade das Raízes das Plantas.

STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

SMOW: *Standard Mean Ocean Water*. Padrão médio de água do oceano.

VMA: Valor Máximo Admissível.

VMR: Valor Máximo Recomendado.

VSMOW: *Vienna Standard Mean Ocean Water*. Viena Padrão médio de água do oceano.

$\delta^{18}\text{O}$: variação dos teores de oxigênio 18.

$\delta^2\text{H}$: variação dos teores de hidrogênio – próton.